

Способ определения центра вращения вибрирующего объекта

Канд. техн. наук, доц. И. П. Кавриго¹⁾, магистр И. А. Осадчий¹⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Для вибродиагностики объектов в промышленности широкое применение находят линейные пьезоэлектрические датчики, вихрековые преобразователи и другие контрольно-измерительные устройства. Способы измерения угловых и линейных колебаний, основанные на использовании таких датчиков, не дают возможности оценки центра вращения либо вершины угла поворота объекта. При вращении ротора могут возникать паразитные колебания, которые в ряде случаев являются следствием дисбаланса. Известные способы измерения угловых и линейных колебаний позволяют обнаружить это явление, но не дают информации для выполнения балансировки данного объекта. Поэтому в статье описывается способ получения мгновенного центра вращения вибрирующего объекта. Это позволяет повысить информативность измерений за счет получения дополнительных данных о положении центра вращения объекта. Такая информация может быть использована для балансировки объекта контроля. Суть данного способа показана на примере пьезоэлектрических датчиков линейных колебаний. На исследуемом объекте закрепляют два трехосевых датчика. Затем выходные сигналы датчиков пересчитывают в угловые колебания объекта (для этого необходимо знать расстояние между датчиками). Далее определяют положения проекций центра вращения объекта в трех ортогональных плоскостях. Мгновенный центр вращения рассчитывают относительно положения одного из датчиков. Рассмотренный способ позволяет одной системой линейных датчиков получить информацию о линейных и угловых колебаниях, а также о положении центра вращения вибрирующего объекта. За счет увеличения количества определяемых параметров перемещения объектов расширяются возможности их диагностики. Также способ позволяет сократить материальные и временные затраты на измерение угловой составляющей колебаний.

Ключевые слова: центр вращения, вибрирующий объект, пьезоэлектрический датчик, вибродиагностика, угловая составляющая колебаний

Для цитирования: Кавриго, И. П. Способ определения центра вращения вибрирующего объекта / И. П. Кавриго, И. А. Осадчий // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 3. С. 242–246

Method for Determination of Rotation Center in Vibrating Object

I. P. Kaurya¹⁾, I. A. Asadchy¹⁾

¹⁾Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Linear piezoelectric gauges, eddy current transducers and other control and measuring devices have been widely applied for vibration diagnostics of objects in industry. Methods based on such gauges and used for measuring angular and linear vibrations do not provide the possibility to assess a rotation center or point angle of an object. Parasitic oscillations may occur during rotor rotation and in some cases the oscillations are caused by dis-balance. The known methods for measuring angular and linear vibrations make it possible to detect the phenomenon and they do not provide information for balancing of the given object. For this very reason the paper describes a method for obtaining instantaneous rotation center in the vibrating object. It allows to improve informational content of the measurements owing to obtaining additional data on position of object rotation center. The obtained data can be used for balancing of a control object. Essence of the given method is shown

Адрес для переписки

Кавриго Игорь Павлович
Военная академия Республики Беларусь
просп. Независимости, 220,
220057, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 287-49-22
uovarb@tut.by

Address for correspondence

Kaurya Igor P.
Military Academy of the Republic of Belarus
220 Nezavisimosty Ave.,
220057, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 287-49-22
uovarb@tut.by

by an example of piezoelectric gauges of linear vibrations. Two three-axial gauges are fixed to the investigated object. Then gauge output signals are recalculated in angular vibrations of the object (for this purpose it is necessary to know a distance between gauges). Further projection positions of the object rotation center are determined on three orthogonal planes. Instantaneous rotation center is calculated according to the position of one of the gauges. The proposed method permits to obtain data on linear and angular vibrations and rotation center position of the vibrating object using one system of linear gauge. Possibilities of object diagnostics are expanded due to increase in number of determined parameters pertaining to object moving. The method also makes it possible to reduce material and time expenses for measurement of an angular vibration component.

Keywords: rotation center, vibrating object, piezoelectric gauge, vibration diagnostics, angular vibration component

For citation: Kaurya I. P., Asadchy I. A. (2016) Method for Determination of Rotation Center in Vibrating Object. *Science & Technique*. 15 (3), 242–246 (in Russian)

Для вибродиагностики объектов промышленности широкое применение находят линейные пьезоэлектрические датчики, вихретоковые преобразователи и др. Реализованные с их использованием способы измерения угловых и линейных колебаний не дают возможности оценки центра вращения (либо вершины угла поворота) объекта. При вращении ротора (или вала) могут возникать паразитные колебания, которые в ряде случаев являются следствием дисбаланса. Указанные способы измерения угловых и линейных колебаний позволяют обнаружить это явление, но не предоставляют информации для выполнения балансировки. В свою очередь, наличие такой информации даст возможность уменьшить время поиска причин дисбаланса, а в ряде случаев – принять меры к их устранению. Поэтому авторы предлагают способ одновременного получения информации о линейных и угловых колебаниях объекта, а также о положении его мгновенного центра вращения.

Частично эта задача решается способом определения параметров колебаний вращающегося ротора [1, 2], согласно которому частота, амплитуда и вид колебаний определяются из частотного спектра датчика. Например, для датчика оборотов – по значениям боковых полос, вызванных модуляцией основного сигнала частотой колебаний ротора. Способ характеризуется упрощенной технологией определения амплитуд и вида колебаний ротора центрифуги и обеспечивает повышенную чувствительность измерений. Недостатком способа является невозможность определения центра вращения исследуемого объекта. Также известен метод измерения многомерных перемещений и обнаружения колебаний торцов лопаток ротора турбомашин, описанный в [3]. Сущность способа заключается в раздельном измерении смещений торцов лопаток в радиальном и осевом направлениях и в направлении вращения ротора, а также в обнаружении низкочастотных колебаний лопаток ротора турбомашин

с помощью трех одновитковых вихретоковых преобразователей, расположенных на статоре турбомашин. Недостатками способа являются невозможность определения центра вращения исследуемого объекта, низкая помехозащищенность вихретоковых преобразователей, а также возможность измерения параметров вибраций только на объектах с металлической поверхностью.

Суть способа, предложенного авторами, основана на использовании пьезоэлектрических датчиков линейных колебаний. В [4] показана возможность получения данной информации в плоскости на примере двухосевых пьезодатчиков. Однако в [4] не приводятся выражения для расчета величины угла поворота и положения центра вращения объекта. При этом оценка величины угла поворота рассматривается для частного случая перемещения объекта. Это дает основание полагать необходимым глубже исследовать данный вопрос. Рассмотрим наиболее общий случай, представленный на рис. 1. На исследуемом объекте закрепляли два трехосевых пьезоэлектрических датчика линейных колебаний, главные оси которых находились попарно в одной из трех ортогональных плоскостей.

Объект, обладающий свойствами абсолютно твердого тела, совершает угловое перемещение с центром вращения, расположенным вне линии установки датчиков. Тогда по известному расстоянию между датчиками VD_1 и VD_2 по амплитудам линейных перемещений объекта Δx_1 , Δx_2 , Δy_1 , Δy_2 , Δz_1 , Δz_2 можно определить угловые колебания ψ по формулам:

- в плоскости XOY

$$\psi_{XOY} = \arctg \left(\frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{l - \Delta y_1 - \Delta y_2} \right); \quad (1)$$

- в плоскости XOZ

$$\psi_{XOZ} = \arctg \left(\frac{\Delta z_1 - \Delta z_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \right); \quad (2)$$

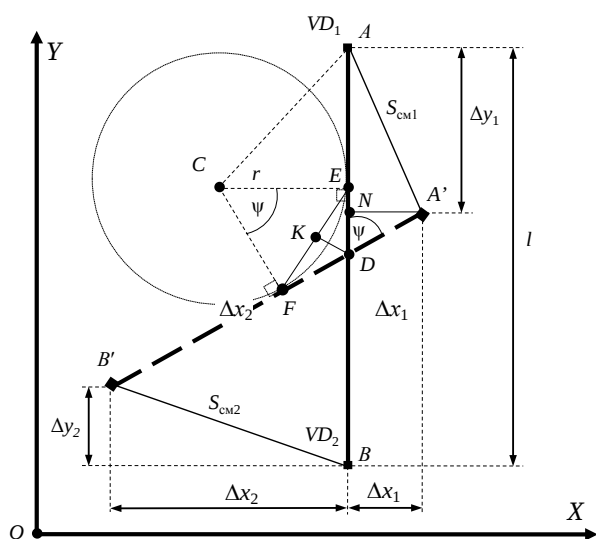


Рис. 1. Колебания жесткого стержня в плоскости XOY

Fig. 1. Vibrations of rigid rod on plane XOY

• в плоскости ZOY

$$\psi_{ZOY} = \arctg\left(\frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{l - \Delta z_1 - \Delta z_2}\right). \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) описывают угловые смещения объекта в соответствующей плоскости и справедливы для угловых колебаний, меньших $\pi/2$. В случае угловых колебаний объекта, больших $\pi/2$, возникает неоднозначность их определения. Линейные перемещения в (1)–(3) выражаются через выходные сигналы датчиков. В [5] показано, что выходной сигнал вибродатчика изменяется по закону

$$I(t) = K_n I \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где K_n – коэффициент передачи, определяемый чувствительностью датчика к измеряемому параметру (смещение, скорость, ускорение); I – максимальная амплитуда сигнала датчика; ω – круговая частота сигнала, соответствующая частоте вибрации тела; φ – начальная фаза сигнала.

В рассматриваемом случае перемещение первого датчика относительно оси OX будет определять выражение

$$\Delta = \frac{I_x T^2}{2K_n \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right)}, \quad (5)$$

где I_x – выходной сигнал датчика виброускорений; T – период колебания.

Покажем, что выражение (4) справедливо. Перемещение жесткого стержня в плоскости XOY и соответствующая ему амплитуда выходного сигнала пьезодатчика показаны на рис. 2. Стержень с закрепленным на нем пьезоэлектрическим датчиком совершает линейное колебание параллельно оси OX на величину Δx .

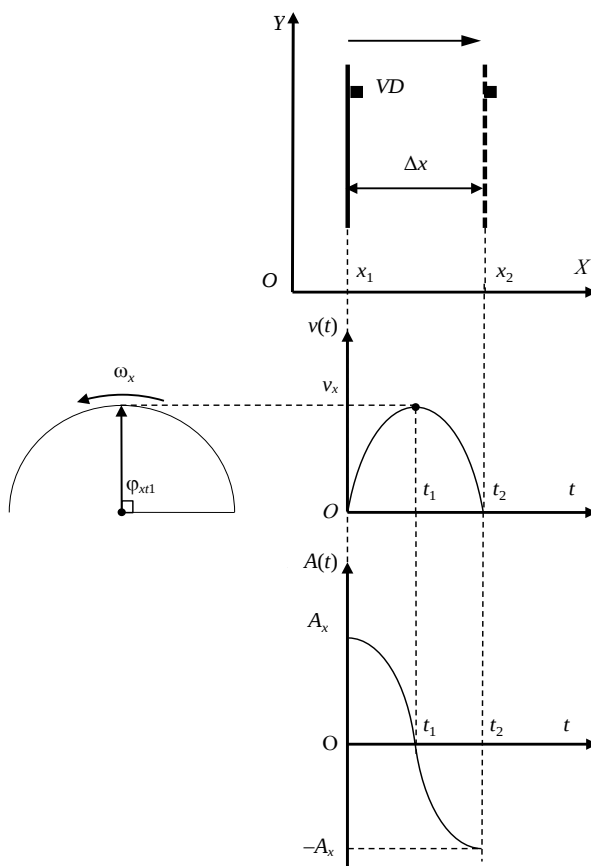


Рис. 2. Принцип формирования выходного сигнала пьезодатчика

Fig. 2. Formation principle of output signal for piezoelectric gauge

В средней части рис. 2 показана зависимость скорости перемещения стержня от времени. Изменение скорости обусловлено инерционностью стержня. Величина скорости зависит от времени t и круговой частоты ω , которая соответствует частоте вибрации объекта. При этом скорость его перемещения можно описать выражением

$$v_x(t) = v_x \sin(\omega t),$$

где v_x – максимальное значение скорости (момент времени t_1 на рис. 2).

Характер изменения ускорения стержня показан в нижней части рис. 2. В момент време-

ни t_1 ускорение $A_{x1} = 0$, а затем к моменту времени t_2 уменьшается до величины $(-A_x)$. Такое изменение ускорения связано со снижением скорости перемещения объекта за счет эффекта торможения. Ускорение объекта можно описать выражением

$$A_x(t) = A_x \cos(\omega t).$$

Учитывая последнее уравнение, запишем выходной сигнал пьезодатчика

$$I_x(t) = K_{пх} A_x \cos(\omega t),$$

где $K_{пх}$ – коэффициент передачи, определяемый чувствительностью датчика к измеряемому параметру (к ускорению); A_x – максимальное ускорение стержня.

Ускорение объекта через скорость определяется уравнением

$$A_x = \frac{v_x}{T},$$

где T – период колебания стержня, т. е. время, за которое пластина пройдет расстояние $2\Delta x$.

Учитывая, что $v_x = 2\Delta x/T$ и выражение (5), получим

$$A_x = \frac{2\Delta x}{T^2} \sin(\omega t). \quad (6)$$

Поскольку A_x – это максимальное ускорение стержня, то (6) можно переписать в виде

$$A_x = \frac{2\Delta x}{T^2}.$$

Круговая частота ω в общем случае равна $2\pi f$, где f – величина, обратная периоду колебания стержня. Тогда с учетом последнего выражения выходной сигнал пьезодатчика можно записать следующим образом:

$$I_x(t) = \frac{2K_{пх}\Delta x}{T^2} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \quad (7)$$

Выражая из (7) перемещение Δx и учитывая (5), угловое смещение ψ_{XOY} объекта в плоскости XOY можно рассчитать по формуле

$$\psi_{XOY} = \arctg \left[\frac{1}{2K_{пх} \cos(\omega t)} \times \left(I - \frac{T^4 (I_{x1}(t) - I_{x2}(t))(I_{y1}(t) - I_{y2}(t))}{2K_{пх} \cos(\omega t)} \right) \right].$$

Угловые смещения в плоскостях XOZ и ZOY определяют по аналогии.

Траектория перемещения вибрирующего абсолютно твердого тела в пространстве при гармонических воздействиях на него будет описываться эллипсоидом вращения. Для определения мгновенных центров вращения такого объекта находят положение проекций мгновенного центра вращения вибрирующего объекта в плоскостях XOY , XOZ и ZOY относительно положения одного из датчиков. Такая возможность является следствием из теоремы Эйлера: произвольное движение закрепленного в точке твердого тела в каждый момент времени может быть представлено как движение некоторой точки и вращение тела с мгновенной угловой скоростью, проходящее через эту точку [2].

Для датчика, расположенного в точке A , центр вращения будет определяться величинами Δx_1 и Δy_1 , а для датчика, расположенного в точке B , – величинами Δx_2 и Δy_2 , которые рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= r_1 \sin \alpha; \quad \Delta x_2 = r_2 \sin \beta; \\ \Delta y_1 &= \frac{r_1^2 + l^2 - r_2^2}{2l}; \quad \Delta y_2 = \frac{l^2 + r_2^2 - r_1^2}{2l}, \end{aligned}$$

где $r_1 = v_1/\omega$, $r_2 = v_2/\omega$ – радиусы проекций мгновенного центра вращения (МЦВ) до соответствующих датчиков; $\alpha = \angle CA'B' = \arccos((r_A^2 + l^2 - r_B^2)/2lr_A)$; $\beta = \angle CB'A' = \arccos((l^2 + r_B^2 - r_A^2)/2lr_B)$.

Из сказанного выше следует, что определение угловых составляющих колебаний и мгновенного центра вращения тела возможно с помощью линейных вибродатчиков. Применение в предложенном способе двух датчиков обусловлено возможностью определения угловых колебаний объектов через линейные только при известных фазовых соотношениях последних.

Для определения МЦВ в пространстве достаточно двух пьезоэлектрических трехосевых датчиков линейных колебаний, имеющих различные по знаку уровни выходных сигналов для соответствующих направлений перемещений. Очевидно, что погрешность предложенного способа зависит от поперечной чувствительности каждой компоненты датчиков, от качества их калибровки и подбора, способа интегрирования выходных сигналов.

Практическая ценность предложенного способа заключается в расширении возможностей технической диагностики за счет увеличения количества определяемых параметров перемещений объекта. Необходимость разработки подобных методов обоснована текущим состоянием и тенденциями развития систем вибраци-

онного контроля [6–9]. Использование данного способа ведет к сокращению материальных и временных затрат на изменение угловой составляющей колебаний. Применение метода возможно, прежде всего, на объектах с низкими частотами и большими амплитудами виброколебаний, а также для систем слежения и наблюдения, центровки и балансировки, решения научно-исследовательских задач, технической диагностики. К таким объектам относятся машины и механизмы, сконструированные с учетом малых зазоров между отдельными элементами и деталями. Поскольку смещение также часто служит параметром при балансировке вращающихся элементов, применение предложенного способа расширяет возможности их диагностирования. Как правило, наибольшие смещения балансируемой детали наблюдаются на частоте вращения [10].

ВЫВОД

Анализ амплитудно-фазовых соотношений выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков позволяет получить дополнительную информацию об угловой вибрации объекта и о положении его мгновенного центра вращения. Использование предложенного способа расширяет возможности диагностики рассмотренных объектов за счет увеличения количества измеряемых параметров вибрации. Также это повышает производительность средств вибродиагностики за счет одновременного определения параметров и линейной, и угловой вибраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измерение колебаний в твердых телах путем непосредственного контакта с детектором: пат. 2382990 РФ: МПК G01H1/00 / А. А. Сперанский, К. Л. Захаров, А. А. Цернант, Л. С. Орбачевский, О. В. Морозов; дата публ.: 27.02.2012.
2. Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом: пат. 2061242 РФ: МПК G01P15/08; G01H1/00 / И. Б. Кобыakov; дата публ.: 27.05.1996.
3. Способ измерения многомерных перемещений и обнаружения колебаний торцов лопаток ротора турбомашин: пат. 2272990 РФ; МПК G01B7/14 / С. Ю. Боровик, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев, В. В. Тулупова; дата публ.: 27.03.2006.
4. Оценка угловых колебаний объектов вибродиагностики / Л. Х. Артеменко [и др.] // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. 2011. № 2. С. 90–95.
5. Марк, С. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям / С. Марк, Р. Л. Торбен. Дания: Глоструп, 1987. 187 с.

6. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. М.: Наука, 1981. С. 219.
7. Тараканов, В. М. Системы непрерывного контроля вибрации производства ООО «Диамех-2000» / В. М. Тараканов, О. Б. Скворцов, А. Е. Сушко // Вибрационная диагностика. 2006. № 2. С. 15–21.
8. Скворцов, О. Б. Современные тенденции развития стационарных систем контроля вибрации / О. Б. Скворцов // Вибрационная диагностика. 2006. № 2. С. 10–14.
9. Урьев, Е. В. Стационарные системы вибрационного контроля. Их роль в создании современных систем диагностики / Е. В. Урьев // Вибрационная диагностика. 2006. № 2. С. 24–26.
10. Измерение и анализ механических колебаний. М.: Московский Технический Центр компании «Брюль и Кьер», 1989. 39 с.

Поступила 16.02.2015

Подписана в печать 27.04.2015

Опубликована онлайн 24.05.2016

REFERENCES

1. Speranskii A. A., Zakharov K. L., Tsernant A. A., Orbachevskii L. S., Morozov O. V. (2012) Measuring Vibrations in Solids by Means of Direct Contact with the Detector. Patent of Russian Federation No 2382990 (in Russian).
2. Kobiakov I. B. (1996) The Three-Component Piezoelectric Vibration Accelerometer with one Sensor. Patent of Russian Federation No 2061242 (in Russian).
3. Borovik S. Yu., Raikov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P., Tulupova V. V. (2006) A Method for Measuring Multidimensional Movements and Detect Vibrations Ends Turbomachine Rotor Blades. Patent of Russian Federation No 2272990 (in Russian).
4. Artemenko L. Kh., Gladeichuk V. V., Asadchy I. A., Skripnik V. M. (2011) Evaluation of Angular Oscillations in Objects of Vibration-Based Diagnostics. *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus* [Bulletin of Military Academy of the Republic of Belarus], (2), 90–95 (in Russian).
5. Mark S., Torben R. L. (1987) *Reference Guide on Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier*. Denmark, Glostrup. 187 (in Russian).
6. Bronstein I. N., Semendyaev K. A. (1981) *Reference Guide on Mathematics*. Moscow, Nauka. 219 (in Russian).
7. Tarakanov V. M., Skvortsov O. B., Sushko A. E. (2006) Systems of Continuous Vibration Control Manufactured by OJC "Diamech-2000". *Vibratsionnaya Diagnostika* [Vibration Diagnostics], (2), 15–21 (in Russian).
8. Skvortsov O. B. (2006) Modern Tendencies in Development of Stationary Vibration Control Systems. *Vibratsionnaya Diagnostika* [Vibration Diagnostics], (2), 10–14 (in Russian).
9. Uriev E. V. (2006) Stationary Vibration Control Systems. their Role in Creation of Modern Diagnostics Systems. *Vibratsionnaya Diagnostika* [Vibration Diagnostics], (2), 24–26 (in Russian).
10. *Measurement and Analysis of Mechanical Vibrations*. Moscow, Moscow Technical Center of "Brüel & Kjær" Company, 1989. 39 (in Russian)

Received: 16.02.2015

Accepted: 27.04.2015

Published online: 24.05.2016